

## 비기계적 입자순환장치(Loop Seal) 연구

선도원<sup>†</sup> · 배달희 · 한근희 · 손재익 · 岑可法\*

한국에너지기술연구소

\*(중국)절강대학교

(1999년 5월 17일 접수, 1999년 8월 10일 채택)

## Study of a Non-mechanical Solid Valve(Loop Seal)

Dowon Shun<sup>†</sup>, Dal Hee Bae, Keun Hee Han, Jae Ek Son and Kefa Cen\*

Korea Institute of Energy Research, Taejon 305-343, Korea

\*Zhejiang University, Hangzhou, China

(Received 17 May 1999; accepted 10 August 1999)

### 요 약

상은 riser와 loop seal로 구성된 순환유동층에서의 수력학적 실험을 통해 입자순환장치(loop seal)의 운전특성과 입자의 흐름 특성을 연구하였다. 0.2 m×0.15 m×0.2 m규격의 상온 loop seal 실험장치를 구성하고 석탄회의 재순환 실험을 수행하였다. 실험을 통해 유동화 공기주입량 및 주입점에 따른 입자흐름 경향을 연구하고, 고체순환속도의 제한조건 및 시스템 압력과의 수학적 관계를 연구하였다. 입자유량은 loop seal 내부 재주입구의 유동화 공기유량의 증가에 따라 증가하였다. 입자유량의 증가에 따라 down comer 고정구간의 차압이 감소하였다.

**Abstract** – The characteristics of loop seal operation and particle flow were investigated by hydrodynamics study in a cold mode riser and loop seal system. The physical dimension of 0.2 m×0.15 m×0.2 m cold mode loop seal and riser is serially connected to compose a experimental system. A coal ash was used for the experiment. The flow pattern of particle was investigated by variation of quantity of fluidizing air and location of aeration. The mathematical relationship of the limitation of particle flow rate and system pressure was analyzed. The particle flow rate increased by the increase of air flow of return leg. The pressure difference of down comer section was reduced as the increase of the particle flow rate.

Key words: Circulating Fluidized Bed, Hydrodynamics, Loop Seal, Coal Ash

### 1. 서 론

순환유동층 연소로는 회재의 재순환을 통하여 연소로 내의 충밀도와 벽면 열전달 계수를 높이고, 재연소를 통하여 연소효율을 증가시킨다[1, 2]. 재순환 시스템의 구성은 사이클론, down comer라고 불리는 회재 하향 이송관, 그리고 입자를 연소로로 재순환시키는 장치로 대표적인 loop seal로 되어 있다.

입자 재순환장치는 순환유동층 연소설비와 같이 운전과정에 다량의 입자가 기체의 흐름에 대해 역방향으로 지속적으로 주입 또는 순환되는 경우에 사용된다. 순환유동층 연소로에서 비기계적 입자순환 장치인 loop seal이 채용되는 이유는 다음과 같다. 첫째, 안정성이다. 순환유동층 연소로가 높은 연소효율과 탈황률, 그리고 열전달 계수를 얻기 위해서는 기본적으로 정상상태에서 운전을 쉽게 유지할 수 있어야 한다. Loop seal은 연소로의 압력과 입자의 순환속도에 따라 인위적인 조작 없이 자동으로 입자흐름의 빠르기가 조절된다. 둘째, 기밀유지이다. 연소로 공기가 사이클론 하단의 입자하향 이송관인 down

comer를 통해 역류하는 경우 사이클론 효율이 심각하게 저하된다. Loop seal은 기계적 밸브와 달리 내부에 입자층을 이루고 이 입자층이 공기의 흐름을 거슬러 흐름으로써 공기의 역류를 차단하는 방법으로 기밀을 유지한다. 셋째, 비기계적이며 인위적인 입자 유속의 조절을 전제로 하지 않는다는 구성원리에도 불구하고 한정된 범위 내에는 입자 유속의 조절도 가능하다. 즉 연소로에서의 입자 비산량이 증가할 경우 loop seal의 유량도 자동으로 증가하며, 이와는 반대로 한정된 부하에서도 loop seal 내부의 유동화 속도를 조절하여 입자유속을 변동시킬 수 있다.

특히 loop seal은 구조와 운전이 간단하여 순환유동층 연소보일러 등에서 널리 쓰이고 있으나 설계기준이 모호하며, 입자의 유동 특성이 잘 밝혀져 있지 않다. 또한 안정적 조업 범위가 제한되어 있다는 단점을 지니고 있다. 연소로에서 입자 순환속도는 순환유동층 보일러의 운전 및 열전달 특성을 평가하는 중요한 인자의 하나이며 이의 측정과 조절이 매우 중요하다. 실험실 규모의 소형장치에서는 대개 입자와 공기흐름을 분리시키는 diversion valve를 고안하여 측정하는 방법 또는 down comer 내에 열전달 장치를 설치하여 회수 열량으로부터 입자유량을 예측하는 방법 등이 있으나 상용 장치에 적용하기 어

<sup>†</sup>E-mail: dshun@kier.re.kr

럽고[3], 그 외의 측정장비를 이용하는 방법도 정확도가 분명하지 않다. 특히 정상상태에서의 down comer에서의 압력변동과 slip velocity는 입자흐름과 직접적인 관계가 있다. 따라서 down comer에서의 입자흐름에 관한 많은 연구가 행하여져 왔으나 loop seal의 거동과 관련된 정량적 해석에 관한 연구는 거의 없다[4-6]. 본 연구는 순환유동층 연소로 내의 입자흐름 특성을 이해하고 재순환 장치 개발을 위한 기초자료를 확보하는데 있다. 재순환장치의 운전특성을 조사하기 위하여 상온조건에서 연소로와 직렬 연결된 입자 재순환장치에서 down comer를 통해 흐르는 입자흐름과 공기흐름과의 관계를 연구하였다. 또한 down comer와 loop seal 내의 층간 차압 변동을 조사하여 입자흐름과의 연관 관계를 규명하고자 하였으며 이로부터 입자유량을 예측하는 방법을 시도하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험은 단면  $200 \times 200$  mm 높이 4.5 m의 riser와 사이클론, 높이 0.18 m, 길이 0.2 m, 폭 0.15의 사각형 구조의 loop seal[7]이 직렬로 연결된 상온 시험장치에서 수행되었다. Fig. 1에 loop seal 장치의 구조도를 나타내었으며 그림에 공기 주입구, 측정점 등이 표시되어 있다. Down comer와 연소로와 연결된 재순환관의 직경은 60 mm로서 단면적은  $0.00196 \text{ m}^2$ 가 된다. Loop seal은 riser 분산판 기준 1,200 mm에 위치한다. 재순환관은 loop seal로부터 연소로 분산판 위 약 250 mm 지점으로  $60^\circ$  경사각으로 회송된다. 그림에서  $h_1$ 은 순환매질이 통과하는 수평관 gap의 높이를,  $h_2$ 는 연소로 재주입구 weir의 높이를 나타낸 것이다. Q1, Q2, Q3은 각각 재주입구의 유동화 공기, down comer의 유동화 공기 및 loop seal의 수평흐름 공기를 나타낸 것이다. 실험중 지정된 구간에서의 압력차를 읽었으며 그 용어와 설명은 다음과 같다.

$\Delta P_1$ : down comer 내 수직 200 mm 구간의 입자층의 층간 차압  
P2-P1

$\Delta P_2$ : loop seal 재주입관 내 수직 150 mm 구간의 차압 P2-P3

$\Delta P_3$ : loop seal과 재주입관 사이의 수평관 100 mm 구간의 차압 P3-P4

실험에 사용된 유동매질은 석탄 연소회재로 평균입경  $0.289 \text{ mm}$ 이며 진밀도  $2,384 \text{ kg/m}^3$ 이다.

입자유량은 순간적으로 재순환부의 공기를 차단하고 10여 초간 입자가 downcomer에 축적되는 양을 재는 방법으로 측정하였다.

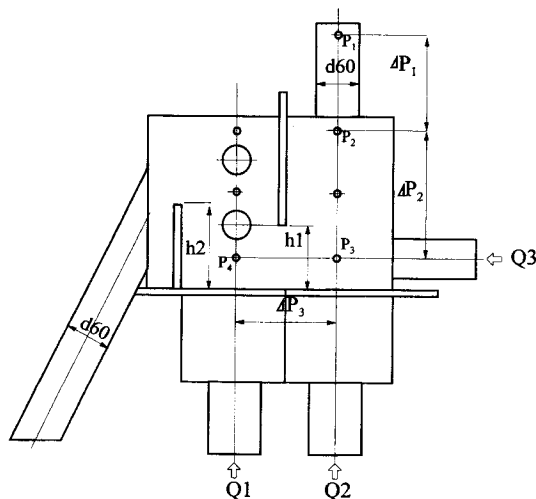


Fig. 1. Diagram of loop seal device.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 Q1, Q2, Q3의 각각의 공기 주입구 중 한 주입구만을 통해 공기를 주입하였을 때의 loop seal을 통한 입자의 흐름현상을 나타내었다. Q1 또는 Q2 공기만을 공급할 때는 공기가 주로 재주입구 내에 쌓인 입자층만을 유동하게 되며 사이클론에서 내려오는 입자를 수평관을 통해 이동시키는 역할을 충분히 하지 못한다. 반면 Q3공기는 주로 수평관이나 down comer 내의 입자를 aeration시키며 유동화된 입자를 수평관을 통해 재주입구 쪽으로 수송하는 역할을 하게 된다. 따라서 입자 흐름이 상대적으로 원만하며 유량도 크다. Loop seal을 통해 회재를 흐르게 하는 초기유량의 크기는 다음과 같이 나타난다.

$$Q3 \leq Q2, Q1$$

단일 공기에 의한 유동에서는 공기유량 변화에 따라 입자흐름의 변화가 크게 나타났다. 따라서 단일 주입점에서의 입자흐름은 가능하나 공기유량 조절에 의한 입자 유량 조절은 불가능한 것으로 나타났다.

Fig. 3에는 Q1, Q2, Q3의 모든 port에서 동시에 공기를 주입하였을 때의 운전 결과를 나타내었다. 공기를 모든 port에서 동시에 주입한 경우 입자 흐름은 공급공기의 총량이 약  $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 부근에서 시작된다. 그

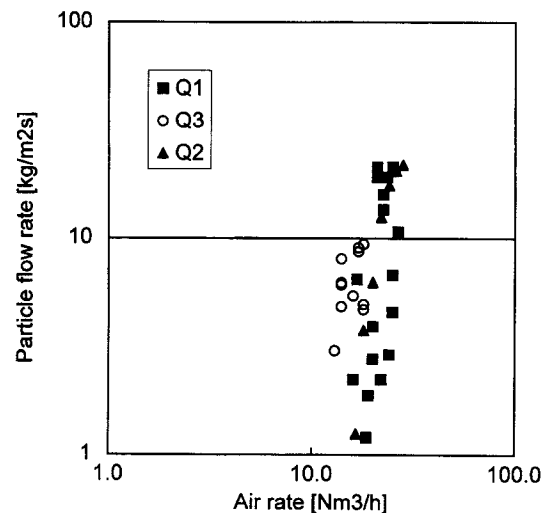


Fig. 2. Particle flow characteristics with single air injection.

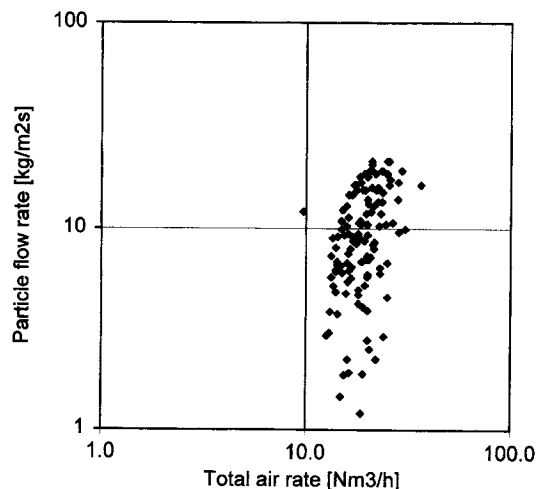


Fig. 3. Particle flow characteristics with multiple air injection.

럼에서 공기유량이 증가함에 따라 입자흐름은 처음에 급하게 증가하다가 완만하게 일정범위에 수렴하는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 최대 입자흐름은 연소로 단면적을 기준으로  $20 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 나타났다. 안정적인 운전은 입자유량이 점차 수렴하는, 즉 커브의 변곡점 부근으로 보여지며 커브가 완만해지는 이 부근에서 유량조절이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 4, 5, 6은 Q1, Q2, Q3 공기 중 다른 두 공기의 유량의 합을 일정하게 유지하면서 나머지 한 공기유량만을 변화시킬 때의 입자흐름 경향을 나타내었다. Fig. 4는 공기의 동시주입 조건하에서 Q2와 Q3 공기의 합을 일정하게 유지한 채 Q1공기의 유량을 변화시키면서 입자순환량을 측정한 결과이다. 공기유량의 증가에 따라 입자순환량은 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 5는 공기의 동시주입 조건하에서 Q1과 Q3 공기의 합을 일정 범위에서 유지한 채 Q2 공기의 유량을 변화시키면서 입자순환량을 측정한 결과이다. Q2 증가에 따라 입자순환량이 미세하나마 줄어드는 경향을 보여주어 aeration 공기량 증가가 입자순환을 방해하는 것처럼 보인다. Fig. 6은 공기의 동시주입 조건하에서 Q1과 Q3 공기의 합을 일정 범위에서 유지한 채 Q3 공기의 유량을 변화시키면서 입자순환량을 측정한 결과이다. Q3 증가에 따른 입자순환량은 거의 불변이거나 Q2에서와 같이 점차 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 7에는 down comer의 차압변동( $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_3$ )과 회재 순환량과의 관계를 나타내었다. 회재 순환속도의 증가에 따라 down comer의 고정 구간 200 mm 내의 차압  $\Delta P_1$ 은 감소하였으며 최대유량은  $\Delta P_1$

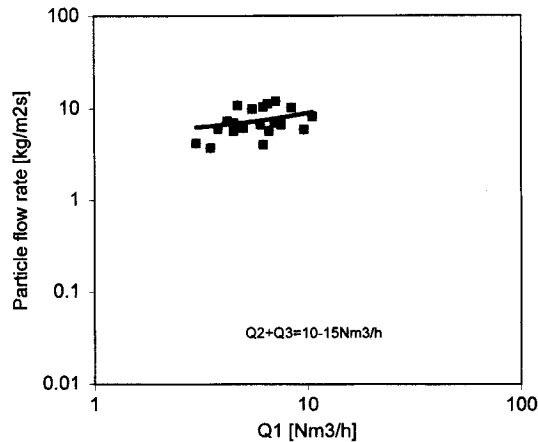


Fig. 4. Effect of return leg fluidizing air(Q1) on particle flow rate.

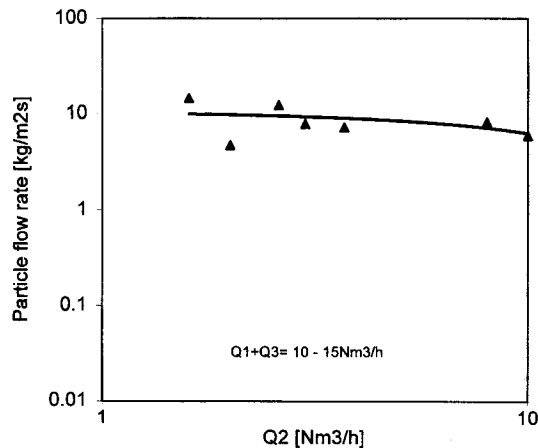


Fig. 5. Effect of down comer fluidizing air(Q2) on particle flow rate.

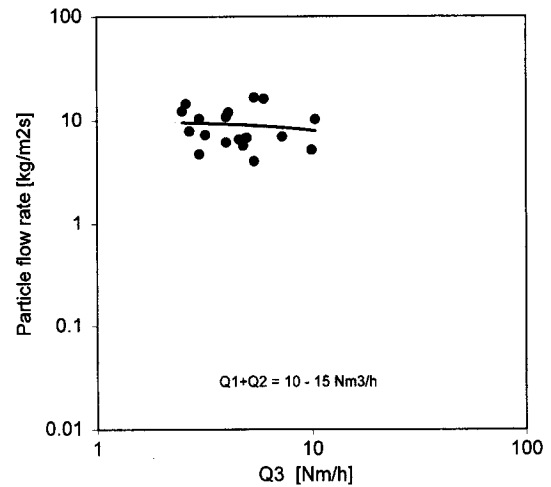


Fig. 6. Effect of down comer side aeration air (Q3) on particle flow rate.

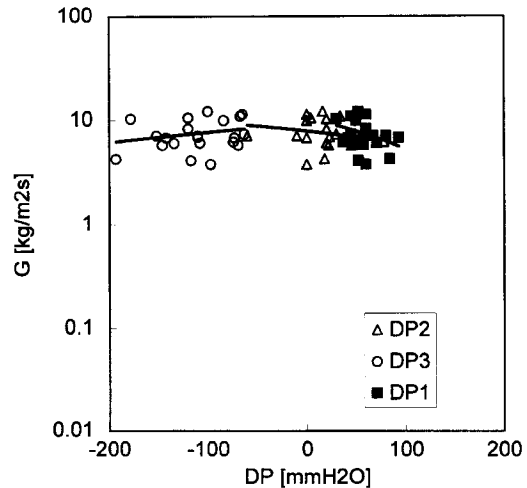


Fig. 7. Effect of pressure difference on particle flow rate.

이 0에 가까울 때 나타났다.  $\Delta P_2$ 의 압력은 입자흐름에 대한 경향성이 불분명하였다.  $\Delta P_2$ 는 loop seal supply chamber의 압력차를 나타낸 것이다.  $\Delta P_2$ 는 loop seal 내의 운전조건에 따라 음의 값과 양의 값을 번갈아 나타내었으나 loop seal 내의 유속, 입자유량에 대해서 특정한 경향을 보여주지 않았다.  $\Delta P_3$ 은 down comer와 supply chamber간의 차압으로 순환유동층과 직렬 연결된 장치에서는 음의 값을 나타내고 있다. 이것은 실험실적인 소형장치와 비교해 비교적 큰 본 장치에서는 입자의 흐름이 연속적으로 일어나지 못하고 supply chamber와 down comer 간의 압력차가 점점 줄어들면서 차압  $\Delta P_3$ 가 양의 값을 나타낼 때 일정량의 입자를 단번에 연소로로 보내기 때문이다. 순환유동층의 loop seal은 재순환 입자를 연소로의 하부에 가까운 splash zone으로 보내게 되고 이 영역의 연소로 공기압은 loop seal에 supply chamber에 영향을 미친다. 따라서 입자가 pulse흐름으로 연소로로 흘러가는 순간을 제외하고는 loop seal 내부 supply chamber 압력이 down comer 하부의 압력보다 항상 큰 값을 나타낸다. 따라서 측정평균 값인 그림에 나타난  $\Delta P_3$ 은 항상 음의 값을 나타내었다.  $\Delta P_3$ 은 Q2와 Q3의 공기 유량증가에 따라 차압이 Fig. 8과 같이 증가하는 경향을 나타내며 Q2, Q3가 입자흐름을 방해하는 특성도 나타났다. 따라서 Fig. 5의 Q2 증가에 따라 입자유량이 감소하는 것은 공기가  $\Delta P_3$ 을 증가시켜 입자의 흐름을 방해하기 때문으로 이해되며 입자유량이 증가함에 따라 차

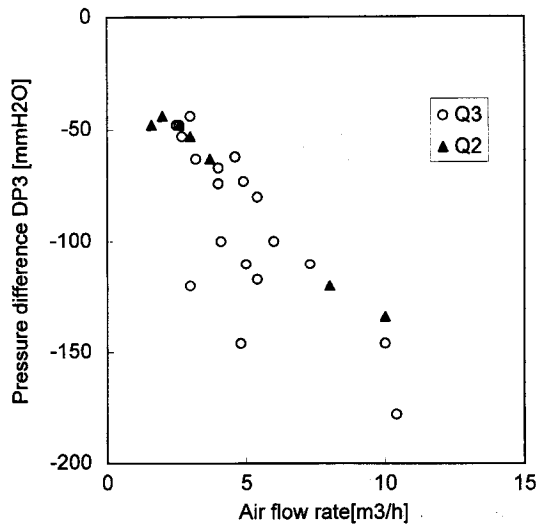


Fig. 8. Effect of air flow rate (Q2, Q3) on pressure difference (ΔP3).

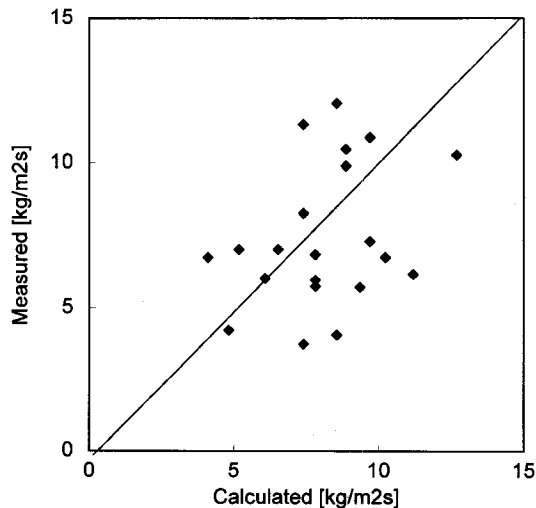


Fig. 9. Comparison of measured and calculated particle flow rate.

압 ΔP1과 ΔP3이 감소하는 경향을 보여준다.

위의 결과로부터 입자순환량의 조절은 recycle chamber의 유동화 공기 Q1의 조절을 통해 얻는 방법이 제일 가능성이 높으며 입자순환량의 정량적 모니터링은 down comer 내 중간압력 ΔP1을 관찰함으로써 가능하다고 판단된다. 연소로와 loop seal에서의 압력평형은 다음과 같이 이루어진다.

$$\Delta P_d - \Delta P_{ls} - \Delta P_c - \Delta P_{cy} = 0$$

이때 각각 첨자 d는 down comer, ls는 loop seal c는 combustor 재주입구의 압력, cy는 사이클론을 나타낸다. 여기서 down comer에 걸리는 입자층의 압력은 반드시 입자의 유량과의 연관관계가 나타나지 않는다. 그것은 입자층의 압력이 층높이에 비례하며 이 층높이는 입자의 유량과 무관하게 riser의 층밀도, 즉 층압에 의해 결정되기 때문이다. 그러나 down comer 내 쌓인 입자층 중의 고정 구간에서 측정 한 차압은 보다 분명하게 입자유속과 반비례하는 연관성을 나타내었다. 또한 이 차압은 정상 운전조건에서는 입자의 흐름을 거슬러 통과하는 공기의 slip velocity에 의해 결정된다는 것을 나타내었다. 입자층의 차압과 공기의 slip velocity와의 관계를 Ergun[8]식을 이용하여 표현한다.

$$\frac{\Delta P_d}{L_d} g_c = 150 \frac{(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu \Delta U}{\Phi_s^2 d_p^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m^3} \frac{\rho_g \Delta U^2}{\Phi_s d_p}$$

여기서,

$\epsilon_m$ : bed의 voidage

$\Phi_s$ : 입자의 sphericity

$d_p$ : Particle diameter

Down comer 입자층  $L_d$  구간을 통과하는 공기의 slip velocity( $\Delta U$ )로부터 다시 입자유속( $U_{ss}$ )을 실험치로부터 도출하고  $G_s = \rho_p(1-\epsilon_s)U_{ss}$ 로 입자유량을 나타낸다. 여기서  $G_s$ 는 입자유량 kg/s down comer,  $\rho_p$ 는 입자의 밀도,  $\epsilon_s$ 는 down comer의 층밀도를 나타낸다. 차압의 증가는 slip velocity의 증가를 의미하고 이는 입자유량의 감소를 나타낸다. Fig. 9에 실험값과 관계식과의 대비를 나타내었다. 입자의 유속과 관련하여 down comer의 입자층이 나타내는 차압과 입자유량과의 관계가 분명히 나타난다. 다만 실험치와 계산치간의 비교값의 분포가 산만하게 나타나는 점은 각각의 aeration 공기가 down comer의 층압력에 영향을 미치는 영향이 복잡하기 때문에 정량화하기 위해서는 추가 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

입자순환장치 loop seal을 이용하여 상온에서 입자순환연구를 수행하였다. 상온 loop seal 장치인 0.2 m×0.15 m×0.2 m를 구성하고 석탄회재 입자의 재순환 실험을 통해 최적 유동화 공기주입량 및 방법을 연구하고, 고체순환속도의 제한조건 및 시스템 압력과의 관계식을 수립하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 입자의 순환은 loop seal장치의 down comer 하부 (Q1), loop seal 수평관 측면(Q2), 그리고 재주입관(Q3) 중 한 곳의 단일 주입만으로도 가능하였다. 그러나 공기주입량 변화에 따른 순환량 변화가 급격하여 유량 조절을 할 수 없었다.

(2) Q1, Q2, Q3에 공기를 동시 주입한 경우 공기유량 증가에 따라 입자유량이 급격히 증가하다가 일정 공기유량 이상에서 입자유량이 수렴함을 보여주었다. 입자유량의 조절은 입자유량 증가곡선이 수렴하는, 즉 커브의 변곡점 부근에서 가능하였다.

(3) 공기량 조절에 의한 입자의 유량조절은 Q1이 가장 분명하였고 Q2, Q3은 유량증가에 따라 유로 내의 차압이 증가하여 결과적으로 흐름을 방해하는 현상도 나타났다.

(4) 압력 변화에 따른 입자유량 변화는 ΔP1과 ΔP3에서 뚜렷하게 나타났으며 유량의 증가에 따라 차압이 감소함을 보여주었다.

(5) Down comer 중간 차압 ΔP1의 증가는 slip velocity의 증가를 나타내고 다시 입자유량의 감소를 나타내었다.

#### 감 사

이 연구는 산업자원부 청정에너지 기술개발 사업으로 지원되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Shun, D., Park, Y. S. and Son, J. E.: *Chemical Industry and Technology*, **13**, 6(1995).
- Shun, D., Bae, D. H., Han, K. H., Son, J. E., Kang, Y., Wee, Y. H., Lee, J. S. and Ji, P. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **34**, 321(1996).
- Burkell, J. J., Grace, J. R. and Lim, C. J.: "Measurement of Solids Circulation Rates in Circulating Fluidized Beds," in *Circulating Flu-*

- idized Bed Technology II, edited by Basu, P. and Large, J. F., Pergamon Press, Oxford, 493(1988).
4. Knowlton, T. M.: "Circulating Fluidized Beds," Grace, J. R., Avidan, A. A. and Knowlton, T. M. eds, ch. 7, Blackie Academic and Professional, London, 585(1997).
  5. Jones, P. J. and Leung, L. S.: "Downflow for Solids through Pipes and Valves," Fluidization, 2/e, edited by Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D., Academic Press, 733(1988).
  6. Knowlton, T. M.: "Nonmechanical Solids Feed and Recycle Devices for Circulating Fluidized Beds," Circulating Fluidized Bed Technology II, edited by Basu, P. and Large, J. F., Pergamon Press, Oxford, 31(1988).
  7. Shun, D., Son, J. E., Jin, G. T. Yi, C. K., Park, J. H., Han, K. H., Bae, D. H. and Cho, S. H.: "Development of Circulating Fluidized Bed Coal Combustion Technology for Cogeneration," Report of Korea Institute of Energy Research, Ministry of Commerce Industry and Energy(1998).
  8. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering," 2nd ed., ch. 3, Butterworth-Heinemann, Stoneham(1991).